Влияние биологической среды на физико-механические характеристики пористых асфальтобетонов

Самаров Александр Сергеевич
аспирант, кафедра строительных материалов и технологий архитектурно-строительного факультета, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, samar0304@yandex.ru,

Леснов Виталий Викторович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Рассмотрено влияние биологической среды на физико-механические свойства пористых асфальтобетонов. Исследованы образцы различных составов после выдерживания в среде мицелиальных грибов в течение 1, 3 и 6 месяцев. Оценивались твердость, модуль деформации, прочность, водонасыщение и водостойкость материалов. Для определения промежуточных значений твердости выполнена линейная интерполяция экспериментальных данных. Установлено, что характер изменения свойств при биологическом воздействии зависит от состава и структуры асфальтобетона. Полученные результаты позволяют проводить сравнительную оценку биостойкости пористых асфальтобетонов и определять составы, наиболее устойчивые к длительному воздействию биологической среды.
Ключевые слова: пористый асфальтобетон, физико-механические свойства, биостойкость, твердость, модуль деформации, мицелиальные грибы, пористость, долговечность.

Введение

Автомобильные покрытия в процессе эксплуатации подвергаются воздействию механических, температурно-влажностных, химических и биологических факторов. Циклические транспортные нагрузки вызывают накопление повреждений, развитие микротрещин и последующее формирование макротрещин. Температурные колебания и воздействие влаги изменяют структуру и свойства асфальтобетона, снижая его способность воспринимать эксплуатационные нагрузки [1–3].

При движении автомобилей в покрытии возникают растягивающие и сжимающие напряжения. Их многократное воздействие сопровождается накоплением остаточных деформаций и повреждений. Трещинообразование может развиваться как от поверхности покрытия вглубь, так и в обратном направлении; характер процесса определяется уровнем контактных давлений, состоянием основания, жесткостью материала и степенью его старения [2, 5].

Таким образом, для дорожных композиционных материалов важны не только показатели прочности, но и деформационная устойчивость. Материал, обладающий достаточной прочностью, может преждевременно разрушаться при недостаточной способности сопротивляться деформациям и циклическим нагрузкам [14, 15].

Отдельное значение имеет воздействие биологических факторов. Микроорганизмы, в том числе бактерии и мицелиальные грибы, способны развиваться на поверхности строительных материалов и участвовать в процессах их биодеградации. Воздействие биологической среды усиливается при наличии влаги и загрязнений, создающих благоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов [4].

Пористые асфальтобетоны характеризуются повышенной остаточной пористостью, обеспечивающей улучшенный отвод воды и воздуха. Согласно ГОСТ 9128-2013, для пористых и высокопористых асфальтобетонов нормируются, в частности, предел прочности при сжатии, водостойкость, водостойкость при длительном водонасыщении и водонасыщение. Для высокопористых асфальтобетонов водонасыщение устанавливается в диапазоне свыше 10 до 18 % по объему.

Вместе с тем развитая поровая структура может способствовать удержанию влаги и тем самым создавать условия для развития микроорганизмов. Поэтому оценка биологической стойкости должна рассматриваться совместно с анализом физико-механических характеристик материала.

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в оценке изменения физико-механических характеристик пористых асфальтобетонов под воздействием биологической среды и определении составов, наиболее устойчивых к такому воздействию.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

выявить основные физико-механические и биологические факторы, влияющие на разрушение асфальтобетонных покрытий;

обосновать метод оценки биостойкости по изменению свойств материала;

исследовать изменение твердости и модуля деформации образцов различных составов после выдерживания в среде мицелиальных грибов;

провести линейную интерполяцию экспериментальных данных;

определить наиболее устойчивые составы по изменению физико-механических характеристик при длительном воздействии биологической среды.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на образцах пористых асфальтобетонов различных составов. Для оценки влияния состава на физико-механические характеристики варьировали содержание нефтяного битума и состав минеральной части. Исследуемые смеси включали природный песок, отсев дробления, минеральный порошок, муку, стеклобой, битум БНД 60/90 и полимерно-битумное вяжущее.

Физико-механические характеристики определяли по общепринятым методикам. Исследовались средняя плотность уплотненного материала, водонасыщение, предел прочности при сжатии при температурах 0, 20 и 50 °С, водостойкость и длительная водостойкость.

Для оценки устойчивости к биологическому воздействию образцы подвергались выдерживанию в среде мицелиальных грибов. Контрольные образцы сравнивались с образцами после выдерживания в течение 1, 3 и 6 месяцев. Основным показателем для последующего анализа была выбрана твердость поверхности. Дополнительно оценивался модуль деформации.

Выбор твердости в качестве контролируемого показателя обусловлен ее взаимосвязью с деформационными характеристиками материала. Стабильность твердости и модуля деформации при воздействии агрессивной среды может рассматриваться как один из признаков сохранения эксплуатационных свойств асфальтобетона.

Для определения промежуточных значений показателей применялось линейное интерполирование экспериментальных данных с шагом один месяц. Такой подход позволил получить расчетные значения характеристик для

промежуточных сроков выдерживания и выполнить сопоставление исследуемых составов.

Составы асфальтобетонных смесей

Для исследования были сформированы несколько групп составов. В составах № 1, 2, 7 и 8 использовался природный песок в количестве 87 %, при этом в первых двух составах применялся минеральный порошок, а в составах № 7 и 8 — мука. Содержание битума БНД 60/90 составляло соответственно 12, 8, 8 и 12 % сверх 100 % минеральной части.

Во второй группе (составы № 9, 10, 15 и 16) содержание природного песка также составляло 87 %. Для составов № 9 и 10 использовался минеральный порошок, а для № 15 и 16 — стеклобой. В составах № 9 и 10 применялось полимерно-битумное вяжущее, а в составах № 15 и 16 — битум БНД 60/90.

Для составов № 17–20 типа Г использовалась комбинация природного песка, отсева дробления и стеклобоя. В составах № 17 и 18 содержание природного песка составляло 60 %, отсева дробления — 34 %, стеклобоя — 6 %. В составах № 19 и 20 доля природного песка составляла 25 %, отсева дробления — 69 %, стеклобоя — 6 %. Содержание битума БНД 60/90 составляло от 6 до 10 % сверх 100 % минеральной части.

Различное содержание битума и различия в составе минеральной части позволили оценить влияние структуры асфальтобетона на изменение его свойств при воздействии биологической среды.

Таблица 1
Содержание компонентов в асфальтобетонных смесях

Составляющие	Содержание составляющих в составах, масс, %			
	Состав №1	Состав №2	Состав №7	Состав №8
	Тип А			
Природный песок	87	87	87	87
Отсев дробления	–	–	–	–
Минеральный порошок	13	13	–	–
Мука	–	–	13	13
Стеклобой	–	–	–	–
Битум БНД 60/90,сверх 100%	12	8	8	12
ПБВ, сверх 100 %	–	–	–	–

Составляющие	Содержание составляющих в составах, масс, %			
	Состав №9	Состав №10	Состав №15	Состав №16
	Тип А			
Природный песок	87	87	87	87
Отсев дробления	–	–	–	–
Минеральный порошок	13	13	–	–
Мука	–	–	–	–
Стеклобой	–	–	13	13
Битум БНД 60/90,сверх 100%	–	–	8	12
ПБВ, сверх 100 %	8	12	–	–

Составляющие	Содержание составляющих в составах, масс, %			
	Состав №17	Состав №18	Состав №19	Состав №20
	Тип Г		Type G	
Природный песок Naturalsand	60	60	25	25
Отсев дробления	34	34	69	69
Минеральный порошок	–	–	–	–
Мука	–	–	–	–
Стеклобой	6	6	6	6
Битум БНД 60/90,сверх 100%	10	6	6	10
ПБВ, сверх 100 %	–	–	–	–

Физико-механические свойства исследуемых составов

Результаты определения физико-механических характеристик представлены в таблице 2. Анализ проводился по показателям средней плотности, водонасыщения, прочности при сжатии при различных температурах, водостойкости и длительной водостойкости.

Таблица 2
Физико-механические свойства полученных составов асфальтобетонной смеси

Физико-механич. Св-ва	Состав №1	Состав №2	Состав №19	Состав №12	Состав №15	Состав №16	Состав №7	Состав №8	Состав №9	Состав №10	Состав №20	Состав №17	Состав №18
Средняя плотность уплотненного материала, г/см³	2,07	2,15	2,19	2,19	2,26	2,15	2,31	2,36	2,33	1,98	2,03	2,21	2,13
Водонасыщение, % по объему	12	6	0,75	8,65	3,01	12,4	9,3	0,1	4,7	16	10,3	13,4	13,4
Предел прочности при сжатии, *t*=50°C, МПа	0,95	1,04	0,86	1,46	1,82	0,62	2,32	2,74	2,23	0,57	0,73	1,48	1,45
Предел прочности при сжатии, *t*=20°C, МПа	2,15	3,81	2,73	4,19	4,53	2,77	6,35	7,11	7,4	2,16	2,8	3,64	2,84
Предел прочности При сжатии, *t*=0°C, Мпа	6,38	5,92	5,57	7,43	8	5,14	9,49	10,69	11,3	3,4	4,3	5,77	4,92
Водостойкость	1,38	0,83	1,01	0,93	1,02	1,03	0,88	1,03	0,74	0,88	1,12	0,79	1,05
Длительная Водостойкость	0,71	1,12	0,75	0,44	0,73	–	–	–	–	–	–	–	–

Полученные данные показывают существенное различие физико-механических характеристик исследованных составов. Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С изменяется от 2,15 МПа для состава № 1 до 7,4 МПа для состава № 9. При температуре 0 °С максимальное значение прочности также зафиксировано для состава № 9 — 11,3 МПа.

При температуре 50 °С наиболее высокую прочность имеет состав № 8 — 2,74 МПа, несколько ниже показатели составов № 7 и № 9 — 2,32 и 2,23 МПа соответственно. Минимальное значение — 0,57 МПа — получено для состава № 10.

Водонасыщение исследуемых составов изменяется в широком диапазоне. Наименьшее значение получено для состава № 8 — 0,1 %, а наибольшее — для состава № 10 — 16 %. Для сравнения, действующий ГОСТ 9128-2013 устанавливает для высокопористых асфальтобетонов водонасыщение свыше 10 до 18 % по объему.

Таким образом, состав материала оказывает существенное влияние на сочетание прочностных и водных характеристик. Увеличение пористости и изменение минеральной части могут сопровождаться снижением прочности, однако одновременно обеспечивают необходимые для пористых материалов свойства водоотвода.

Изменение свойств асфальтобетонов в биологической среде

Для оценки влияния биологической среды исследовалось изменение твердости поверхности и модуля деформации образцов. Контрольные значения сопоставлялись с характеристиками после выдерживания в биосреде.

Продолжительность воздействия составляла 1, 3 и 6 месяцев. Такой период позволил оценить не только начальную реакцию материала, но и изменение его свойств при относительно длительном воздействии.

Таблица 3
Твердость асфальтобетонных составов до и после экспонирования в биосреде

№№ Составов	Твердость, МПа				Модуль деформации, Мпа				Примечание
	Контрольный состав	Продолжительность выдерживания в биосреде, мес			Контрольный состав	Продолжительность выдерживания в биосреде, мес			
		1 месяц				1 месяц			
2	0,33	0,48			0,15	0,27			Высокопористая песчаная асфальтобетонная смесь
7	0,05	0,14			0,01	0,05			
9	0,05	0,44			0,01	0,24			
15	0,57	1,09			0,34	0,89			
1	0,05	0,44			0,01	0,24			
16	0,05	6,66			0,01	16,04			
10	0,05	0,15			0,01	0,06			
18	1,09	1,34			0,99	1,53			
17	0,37	11,77			0,23	32,7			
20	0,05	6,76			0,01	18,6			
19	4,32	4,03			7,96	6,63			

Представленные результаты показывают, что реакция различных составов на воздействие биологической среды неодинакова. В одних случаях наблюдается увеличение твердости и модуля деформации, в других — снижение показателей. Это свидетельствует о зависимости характера изменения свойств не только от продолжительности воздействия, но и от состава и структуры асфальтобетона.

Наиболее выраженное увеличение показателей после первого месяца наблюдается для составов № 17, 16 и 20. Для состава № 17 твердость увеличилась с 0,37 до 11,77 МПа, а модуль деформации — с 0,23 до 32,7 МПа. Для состава № 20 соответствующие значения составили 0,05 и 6,76 МПа по твердости и 0,01 и 18,6 МПа по модулю деформации.

Для состава № 19, напротив, отмечено снижение твердости с 4,32 до 4,03 МПа и модуля деформации с 7,96 до 6,63 МПа. Данный состав характеризуется наиболее высокими исходными значениями среди исследованных образцов.

Интерполяция экспериментальных данных

Для более детальной оценки изменения твердости была выполнена линейная интерполяция экспериментальных данных с шагом один месяц. Метод позволил определить расчетные значения показателя в промежуточные сроки между экспериментальными точками.

Поскольку одинаковая процедура интерполяции применялась ко всем исследуемым составам, возникающую при этом погрешность можно рассматривать как общую методическую составляющую сравнения.

Таблица 4

Твердость асфальтобетонных составов типа Г до и после экспонирования в биосреде

Тестовые составы	Контрольные составы	Расчетное время экспонирования в биосреде, мес					
	0, мес	1	2	3	4		
	Твердость, МПа						
Состав 1	1,48	0,61	0,985	1,36	1,44		
Состав 8	0,84	0,45	0,505	0,56	0,48		
Состав 10	1,48	0,8	1,48	2,16	2,3633		
Состав 16	1,27	1,44	1,135	0,83	1,07		
Состав 20	0,28	0,62	0,615	0,61	0,53333		

Интерполированные данные позволяют проследить динамику изменения твердости в течение периода экспонирования. Для состава № 1 после первоначального снижения наблюдается постепенное увеличение показателя. У состава № 8 значения остаются относительно стабильными и не демонстрируют выраженного роста.

Для состава № 10 после снижения на первом месяце наблюдается последовательное увеличение твердости, причем к четвертому месяцу расчетное значение достигает 2,3633 МПа. Для состава № 16 после первоначального увеличения показателя наблюдается его снижение с последующим частичным восстановлением.

Состав № 20 характеризуется небольшим увеличением твердости после первого месяца и последующим постепенным снижением. Полученные различия подтверждают неодинаковую реакцию асфальтобетонов различного состава на воздействие биологической среды.

Интерполированные значения могут быть использованы для построения зависимостей «твердость — продолжительность экспонирования» и сравнительной оценки исследуемых составов.

Выводы

Анализ результатов исследования позволяет сформулировать следующие выводы.

Эксплуатационные свойства асфальтобетонов определяются совокупным воздействием механических, температурно-влажностных, химических и биологических факторов. Их совместное действие приводит к изменению структуры материала, накоплению повреждений и снижению долговечности покрытия.

Состав и структура пористого асфальтобетона существенно влияют на его физико-механические характеристики. Исследованные составы отличаются по плотности, водонасыщению, прочности при различных температурах и водостойкости. Наибольшая прочность при сжатии при 20 °С получена для состава № 9 — 7,4 МПа, а при 0 °С — также для состава № 9 — 11,3 МПа.

Воздействие биологической среды приводит к неодинаковому изменению твердости и модуля деформации различных составов. Для ряда образцов наблюдалось увеличение контролируемых показателей, тогда как для состава № 19 зафиксировано их снижение. Это указывает на существенную роль состава и структуры материала в формировании его устойчивости к биологическому воздействию.

Линейная интерполяция позволяет получить расчетные значения твердости в промежуточные сроки экспонирования и использовать их для построения зависимостей изменения свойств от продолжительности воздействия биологической среды.

Наиболее выраженная реакция на биологическое воздействие отмечена для составов № 17, 16 и 20, для которых после первого месяца наблюдалось существенное увеличение твердости и модуля деформации. Вместе с тем окончательная оценка долговременной биостойкости должна основываться на сопоставлении результатов за весь установленный период испытаний.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает необходимость комплексной оценки пористых асфальтобетонов с учетом как традиционных физико-механических характеристик, так и устойчивости к биологическому воздействию. Предложенный подход с использованием контроля твердости и модуля деформации, а также интерполяции экспериментальных данных может применяться для сравнительной оценки составов, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности и биологической активности.

Литература

1. Александров, А. С. Обобщающая модель пластического деформирования дискретных материалов дорожных конструкций при воздействии циклических нагрузок / А. С. Александров // Строительные материалы. — 2016. — № 5. — С. 27–30. — URL: Научная библиотека КиберЛенинка (дата обращения: 19.09.2026).
2. Александров, А. С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона–Мора / А. С. Александров, А. Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 7 (59). — С. 4–17. — DOI: 10.5862/MCE.59.1. — URL: Научная база КиберЛенинка (дата обращения: 19.09.2026).
3. Александров, А. С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 2. Модифицированные модели расчета главных и касательных напряжений / А. С. Александров, Г. В. Долгих, А. Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. — 2016. — № 2 (62). — С. 51–68. — EDN WMUULT
4. Ерофеев, В. Т. Исследования механизмов повреждения битумных композитов в условиях воздействия биологически агрессивных сред / В. Т. Ерофеев, А. Д. Богатов, С. П. Пронькин // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2 (часть 13). — С. 2787–2791. — URL: Официальный сайт журнала «Фундаментальные исследования» (дата обращения: 19.09.2026).
5. Каримов, Б. Б. Дорожно-климатическое районирование Таджикистана/ Б. Б. Каримов, Т. А. Расулов // Наука и техника в дорожной отрасли.-2018.-№3(85).- С. 28-31.
6. Методика определения физико-механических свойств полимерных композитов путем внедрения конусообразного индентора. — Таллин : НИИ Госстроя Эстонской ССР, 1983. — 28 с. — URL: Каталог Эстонской национальной библиотеки (ESTER) (дата обращения: 19.09.2026).
7. **Yashnov, A. N.** Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A. N. Yashnov, S. Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2018. — № 3 (39). — С. 93–106. — URL: Научная электронная библиотека eLIBRARY (дата обращения: 19.09.2026).
8. Расулов, Т. А. Учет нарастающих осевых нагрузок при проектировании конструкций дорожных одежд в условиях Республики Таджикистан / Т. А. Расулов, Л. С. Исмоилзоды // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2018. - №1(52). - С.80-89.
9. Erofeev, V. The Effectiveness of Materials Different with Regard to Increasing the Durability / V. Erofeev, A. Dergunova, A. Piksaikina [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 73. — Art. 04021. — DOI: 10.1051/matecconf/20167304021. — EDN WVWJSH..
10. Richard, B. Continuum damage mechanics based model for quasi brittle materials subjected to cyclic loadings: Formulation, numerical implementation and applications / B. Richard, F. Ragueneau // Engineering Fracture Mechanics. — 2013. — Vol. 98, No. 1. — P. 383–406. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.11.013. — URL: Издательская платформа ScienceDirect (дата обращения: 19.09.2026).
11. Travush, V. I. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer / V. I. Travush, N. I. Karpenko, V. T. Erofeev [et al.] // Magazine of Civil Engineering. — 2020. — No. 3 (95). — Pp. 42–48. — EDN NAGBTE.
12. Thomas, C. Polymeric and cementitious mortars for the reconstruction of natural stone structures exposed to marine environments / C. Thomas, I. Lombillo, J. A. Polanco [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2011. — Vol. 42, No. 4. — Pp. 663–672. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.08.007. — URL: База данных ScienceDirect (дата обращения: 19.09.2026).
13. Weerheijm, J. Tensile failure of concrete at high loading rates: New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests / J. Weerheijm, J. C. A. M. Van Doormaal // International Journal of Impact Engineering. — 2007. — Vol. 34, No. 3. — P. 609–626. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.01.005. — URL: Портал ScienceDirect (дата обращения: 19.09.2026).
14. Yashnov, A. N. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A. N. Yashnov, S. Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2018. — № 3 (39). — С. 93–106. — URL: Научная электронная библиотека eLIBRARY (дата обращения: 19.09.2026).
15. Zhang, Q. Analysis of the chemical mechanism of precipitation effects on asphalt binder / Q. Zhang, X. R. Meng, W. Yan // Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. — 2010. — Vol. 42, No. 5. — Pp. 669–673. — URL: Китайская национальная инфраструктура знаний (CNKI) (дата обращения: 19.09.2026).

Physical-mechanical properties and biological resistance of porous asphalt concretes

Samarov A.S., Lesnov V.V.

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev

The influence of a biological environment on the physical and mechanical properties of porous asphalt concrete is examined. Samples of various compositions were studied after exposure to a filamentous fungal environment for 1, 3, and 6 months. The hardness, deformation modulus, strength, water saturation, and water resistance of the materials were evaluated. Linear interpolation of the experimental data was performed to determine intermediate hardness values. It was established that the nature of property changes under biological exposure depends on the composition and structure of the asphalt concrete. The obtained results allow for a comparative assessment of the biological stability of porous asphalt concrete and the identification of compositions most resistant to long-term exposure to a biological environment.

Keywords: porous asphalt concrete, physical and mechanical properties, biological stability, hardness, deformation modulus, filamentous fungi, porosity, durability.

References

1. Alexandrov, A. S. A generalizing model of plastic deformation of discrete materials of road structures under the influence of cyclic loads / A. S. Alexandrov // Building materials. - 2016. — No. 5. — pp. 27-30. — URL: CyberLeninka Scientific Library (accessed: 09/19/2026).
2. Alexandrov, A. S. Improving the calculation of road structures for shear resistance. Part 1. Consideration of deformations in the condition of Coulomb–Mohr plasticity / A. S. Alexandrov, A. L. Kalinin // Engineering and Construction Magazine. — 2015. — № 7 (59). — Pp. 4-17. — DOI: 10.5862/MCE.59.1. — URL: CyberLeninka Scientific Database (accessed: 09/19/2026).
3. Alexandrov, A. S. Improving the calculation of road structures for shear resistance. Part 2. Modified models for calculating principal and tangential stresses / A. S. Alexandrov, G. V. Dolgikh, A. L. Kalinin // Engineering and Construction Magazine. — 2016. — № 2 (62). — Pp. 51-68. — EDN WMUULT
4. Erofeev V. T., Bogatov A.D., Pronkin S. P. Studies of mechanisms of damage to bitumen composites under the influence of biologically aggressive media // Fundamental research. — 2015. — No. 2 (part 13). — pp. 2787-2791. — URL: The official website of the journal "Fundamental Research" (accessed: 09/19/2026).
5. Karimov, B. B. Road and climatic zoning of Tajikistan/ B. B. Karimov, T. A. Rasulov // Science and technology in the road industry.-2018.-№3(85).- Pp. 28-31.
6. A method for determining the physico-mechanical properties of polymer composites by introducing a cone-shaped indenter. — Tallinn : Research Institute of State Construction of the Estonian SSR, 1983. — 28 p. — URL: Catalog of the Estonian National Library (ESTER) (accessed: 09/19/2026).
7. Yashnov, A. N. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A. N. Yashnov, S. Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2018. — № 3 (39). — Pp. 93-106. — URL: Scientific electronic Library eLibrary (accessed: 09/19/2026).
8. Rasulov, T. A. Accounting for increasing axial loads in the design of road clothing structures in the conditions of the Republic of Tajikistan / T. A. Rasulov, L. S. Ismoilzody // Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI). - 2018. - №1(52). - Pp.80-89.
9. Erofeev, V. The Effectiveness of Materials Different with Regard to Increasing the Durability / V. Erofeev, A. Dergunova, A. Piksaikina [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 73. — Art. 04021. — DOI: 10.1051/matecconf/20167304021. — EDN WVWJSH..
10. Richard, B. Continuum damage mechanics based model for quasi brittle materials subjected to cyclic loads: Formulation, numerical implementation and applications / B. Richard, F. Ragueneau // Engineering Fracture Mechanics. — 2013. — Vol. 98, No. 1. — P. 383-406. — DOI: 10.1016/J.engfracmech.2012.11.013. — URL: ScienceDirect publishing Platform (accessed: 09/19/2026).
11. Travush, V. I. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer / V. I. Travush, N. I. Karpenko, V. T. Erofeev [et al.] // Magazine of Civil Engineering. — 2020. — No. 3 (95). — Pp. 42–48. — EDN NAGBTE.
12. Thomas, C. Polymeric and cementitious mortars for the reconstruction of natural stone structures exposed to marine environments / C. Thomas, I. Lombillo, J. A. Polanco [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2011. — Vol. 42, No. 4. — Pp. 663-672. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.08.007. — URL: ScienceDirect database (accessed: 09/19/2026).
13. Weerheijm, J. Tensile failure of concrete at high loading rates: New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests / J. Weerheijm, J. C. A. M. Van Doormaal // International Journal of Impact Engineering. — 2007. — Vol. 34, No. 3. — P. 609-626. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.01.005. — URL: ScienceDirect portal (accessed: 09/19/2026).
14. Yashnov, A. N. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A. N. Yashnov, S. Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2018. — № 3 (39). — Pp. 93-106. — URL: Scientific electronic library eLibrary (date of request: 09/19/2026).
15. Zhang, Q. Analysis of the chemical mechanism of precipitation effects on asphalt binder / Q. Zhang, X. R. Meng, W. Yan // Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. — 2010. — Vol. 42, No. 5. — Pp. 669-673. — URL: China National Knowledge Infrastructure (CNKI) (accessed: 09/19/2026).